

PERSISTENCIA DE LA DESCOMPACTACION DEL SUELO REALIZADA CON ESCARIFICADORES DE MONTANTES ANGULADOS EN SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA

PERSISTENCE OF SOIL LOOSENING WITH BENT LEG SUBSOILERS IN NO TILLAGE SYSTEMS

Juan Martín Guecaimburú^{1*}, Rafael Introcaso¹, Juan Manuel Vázquez¹, Verónica Rojo¹ y Gisela Reposo¹.

¹ Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján. C.P. 6700. Luján, Argentina.

* Autor para correspondencia E-mail: jmguecaimburu@yahoo.com.ar

RESUMEN

La adopción de la siembra directa en Argentina ha tenido consecuencias negativas para los suelos. Independientemente de los beneficios de la técnica, la compactación por el tránsito de máquinas agrícolas puede llevar a los suelos a condiciones limitantes para el crecimiento de los cultivos. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto y la persistencia de la descompactación por tratamiento mecánico del suelo, realizado con herramientas de montantes angulados rectos del tipo Paratill, en un sistema con manejo en siembra directa continua. El ensayo se realizó en la localidad de Azcuénaga, partido de San Andrés de Giles, Provincia de Buenos Aires, en un suelo Argiudol típico. Los tratamientos ensayados fueron: siembra directa continua sin descompactación (SDC) y siembra directa con descompactación (SDD). Los parámetros evaluados fueron infiltración básica con infiltómetro de disco, resistencia mecánica con penetómetro de cono, densidad aparente por el método del cilindro y humedad gravimétrica. Del análisis de los resultados de densidad aparente y resistencia a la penetración surge que un suelo con 10 años de siembra directa continua presenta niveles de compactación que pueden limitar el desarrollo de los cultivos. En estos suelos los descompactadores tipo Paratill generan un aflojamiento no uniforme en la superficie trabajada, concentrándose la roturación en las líneas de acción de la herramienta. Como consecuencia, mejora la infiltración básica y se reduce la resistencia mecánica al desarrollo de raíces. Si bien este aflojamiento persiste hasta un año, el incremento de la infiltración básica que provoca la descompactación se extiende el doble de tiempo.

Palabras clave: paratill, parámetros físicos, siembra directa

ABSTRACT

Adoption of no-tillage cropping practices in Argentina has had a negative impact on soil quality and crop production. Regardless of the benefits of this technique, compaction by farm machinery traffic can lead to soil constraints to crop growth. The aim of this study was to evaluate the effect and persistence of decompaction by mechanical treatment of the soil with bent leg subsoilers like Paratill, in continuous no-tillage systems. The trial was conducted near Azcuénaga, Province of Buenos Aires, on a typical Argiudol soil. The treatments tested were: continuous no-tillage (SDC) and no-tillage with soil loosening (SDD). The soil properties evaluated were: basic infiltration rate, mechanical strength, bulk density and gravimetric moisture. The results of bulk density and penetration resistance indicate that a soil with 10 years of continuous tillage presents compaction levels that can limit crop development. In these types of soils, the use of a Paratill bent leg subsoiler generates an irregular soil loosening in the lines of work. This results in improved soil basic infiltration and

reduced mechanical resistance to root growth. While loosening extends up to one year, increased basic infiltration extends twice as long

Key words: paratill, soil physical properties, no tillage

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas en Argentina se ha producido un proceso de agriculturización, caracterizado por el incremento de la superficie destinada a cultivos anuales en reemplazo de la superficie de pasturas perennes (Díaz-Zorita et al., 2002; Navarrete et al., 2007). Esto produjo un incremento de los procesos de erosión y degradación física de los suelos (Falotico et al., 1999), que ha sido parcialmente revertido con la adopción de la siembra directa, gradualmente a partir de los años ochenta, y en gran medida desde la aparición de la soja resistente al glifosato desde 1996 (Satorre, 2005).

Si bien existen antecedentes sobre el efecto favorable de la siembra directa sobre la porosidad en el largo plazo (Fontanetto y Keller, 1998; Quiroga et al., 1998), hay una problemática diferente de acuerdo al tipo de suelo. Los suelos de texturas limosas y finas, tales como los prevalencecientes en la Pampa Ondulada, desarrollan compactación superficial determinada por un aumento en la densidad aparente y en la resistencia mecánica (Guecaimburu et al., 2005). La ausencia de remoción del suelo en siembra directa agrava procesos de compactación por tráfico de maquinaria agrícola y la consolidación natural de las partículas del suelo (Chagas et al., 1994; Domínguez et al., 2000; Ferreras et al., 2000), comprometiendo el rendimiento de los cultivos (Abu Hamdeh, 2003; Bonel et al., 2005). La tasa de elongación de raíces disminuye en la medida que aumenta la compactación del suelo, llegando a reducirse a la mitad cuando la resistencia a la penetración supera los 2 Mpa (Bengough et al., 2011). En los procesos de compactación, las partículas del suelo se reacomodan alcanzando un contacto más estrecho entre sí, incrementando de ese modo la densidad aparente (Soil Science Society of America, 1996), además de una reducción en la conectividad de los poros, lo que resulta en una reducción en la conductividad hidráulica (Vogel and Roth, 1998; Schäffer et al., 2007).

Esta restricción mecánica puede ser solucionada con una labor profunda capaz de aflojar mecánicamente el suelo (Taboada, 1998; Montico et al., 2002). Las rejas utilizadas para descompactar el suelo provocan su roturación, siempre que la condición del mismo sea friable. La roturación del suelo se puede extender hasta la profundidad crítica, que es la máxima a la que se produce la

fractura del suelo. Si se trabaja por debajo de la dicha profundidad el suelo se deforma a los costados de las rejas descompactadoras, antes que fracturarse por encima de las mismas (Spoor, 2006). La profundidad crítica no tiene un valor fijo y debe ser determinada en la oportunidad de cada labor para no trabajar por debajo de la misma. En este sentido, la labranza profunda reduce y reorganiza los bloques del suelo, incrementando el volumen de macroporos, su continuidad y la infiltración. El agua se mueve rápidamente por los macroporos de los bloques de suelo (Mohanthy et al., 2007), y la orientación estructural de los sólidos influencia de manera directa la geometría porosa y su continuidad espacial (Suwardji and Eberbach, 1998; Dorner and Horn, 2009). Bonel et al. (2004) evaluaron el efecto de una labranza con un descompactador de montantes rectos sobre un suelo Argiudol vértico con 12 años de siembra directa, encontrando dos meses después de la labor, una reducción de la densidad aparente y la resistencia a la penetración entre 0 y 0,2 m de profundidad, y un deterioro de la condición del suelo entre 0,2 y 0,35 m, observado en el incremento de los mismos parámetros luego de la labranza. La infiltración solo fue afectada positivamente en las líneas de acción de los montantes del descompactador.

Aunque se ha indicado que los efectos de la descompactación pueden durar entre 3 y 4 años (Twomlow et al., 1994; Raper et al., 2005) en numerosos trabajos se ha encontrado que los efectos del subsolado se pierden en una estación de cultivo (Busscher et al., 2000; Reposo y Bonvecchi, 2012), o en dos (Ressia et al., 2010).

Respecto a la persistencia de la descompactación, Spoor et al. (2003) sostienen que las operaciones de descompactación del suelo frecuentemente son identificadas con una considerable roturación y pérdida de capacidad portante, si bien estas características no son convenientes al momento de volver a transitar el suelo, ya que favorecerían la recompactación. Recomiendan realizar labores que generen en el suelo fisuras verticales, que favorezcan el drenaje y el desarrollo de raíces a través de las zonas compactadas, pero sin roturar el suelo, para evitar la pérdida de capacidad portante y el riesgo de recompactación. Entre las herramientas que realizarían este tratamiento del suelo mencionan los descompactadores de rejas aladas y los de montantes angulados (también conocidos como Paratill).

Referido a este tipo de herramientas, Álvarez et al. (2009) evaluaron el efecto del uso de descompactadores de montantes angulados rectos (Paratill) y curvos (Cultivie) y Ewen et al. (2012) evaluaron descompactadores tipo Paraplow de montantes angulados rectos. Los efectos positivos iniciales sobre la resistencia a la penetración y la densidad aparente, se desaparecieron antes de un año desde la descompactación, pero no se evaluó la persistencia de la mejora registrada en la infiltración básica luego de la descompactación. La evolución de este último parámetro es el que permitiría evaluar la persistencia de las fisuras verticales asociadas al uso de montantes angulados para descompactar el suelo.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la descompactación del suelo mediante labranza vertical con un escarificador de montantes angulados rectos (Paratill) en un manejo de siembra directa continua.

La hipótesis de trabajo fue que el tratamiento mecánico del suelo realizado con descompactadores de montantes angulados rectos, produce una mejora en la condición física del suelo que persiste más allá del ciclo de cultivos anuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y tratamientos

El estudio se realizó en la localidad de Azcuénaga (34°19'47,25" S, 59°25'58,95" O), partido de San Andrés de Giles, provincia de Buenos Aires, dentro de la subregión Pampa Ondulada de la Región Pampeana. El suelo es un Argiudol típico franco arcillo limoso, fase erosionado, Serie Solís (GeoINTA, 2013). Las características principales del horizonte A son: suelo franco-arcilloso; estructura en bloques sub-angulares, medios, fuertes; pH 5,3; materia orgánica 2%.

El área de estudio se encontraba bajo siembra directa continua desde hace diez años. En el mes de mayo del año 2008 se efectuó una labor de labranza vertical con un descompactador de montantes angulados rectos (Paratill). La profundidad de labor fue a 0,3 m y la disposición de los montantes sobre el bastidor se realizó de forma que las líneas de acción de las rejas fuera de 0,5 m. Balbueno et al. (2009) sostienen que para lograr adecuados valores de resistencia específica y uniformidad en la labranza vertical, el espaciamiento entre los órganos activos (rejas) debe estar en el orden de $1,4 \pm 25\%$ veces la profundidad de trabajo.

Se descompactaron tres franjas de 50 m de ancho y 200 m de largo. Los tratamientos fueron: SDC Siembra directa continua, y SDD siembra directa con descompactación. La secuencia de cultivos empleada fue trigo/soja; soja de 1º y maíz. Se aplicó fertilización con nitrógeno y fósforo en

el momento de la siembra de cada cultivo, a fin de evitar que la disponibilidad de nutrientes se constituyera en una limitante para su desarrollo.

El diseño experimental fue un diseño de bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones (Lyman-Ott and Longnecker, 1993).

Mediciones en el suelo

La densidad aparente (Dap) se midió con el método del cilindro (Chan, 2002). Debido a que la densidad aparente se ha observado como un parámetro poco sensible para detectar los efectos de los sistemas de labranza (Medvedev, 2009), también se midió la resistencia mecánica (RM) con penetrómetro de cono. Las mediciones de resistencia mecánica se realizaron a seis profundidades: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 cm. Para la determinación del perfil hídrico del suelo las mediciones se realizaron para cada horizonte de suelo. Para los horizontes superficiales, hasta 0,40 m de profundidad, se utilizó el método gravimétrico. Con el objetivo de cuantificar los diferentes flujos de infiltración al final del ciclo de los cultivos, se efectuaron mediciones a campo con infiltrometro de disco (Smith, 2002). En todos los casos se realizaron tres repeticiones por tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSION

Densidad aparente

Los valores de densidad aparente medidos en el suelo sin descompactar (Tabla 1), permiten identificar una zona de mayor compactación entre la superficie del suelo y 0,2 m de profundidad, respecto de la capa subyacente que se encuentra entre 0,2 y 0,4 m de profundidad. Esta densificación superficial en un suelo que presenta una historia de manejo de 10 años en siembra directa coincide con lo sostenido por Guacaimburu et al, (2005) en cuanto a que en los suelos de la Pampa Ondulada, la siembra directa no solo no mejora la porosidad, sino que la pierde. De la Tabla 1 también surge que luego de la descompactación con montantes angulados, el suelo presenta valores de densidad aparente significativamente menores a las dos profundidades evaluadas, a diferencia de Bonel et al. (2004), que al descompactar con montantes rectos, solo registraron un aflojamiento del suelo hasta los 0,2 m de profundidad y un empeoramiento de la condición inicial bajo esa profundidad.

De acuerdo a lo sostenido por Busscher et al. (2000), los efectos del tratamiento mecánico del suelo se pierden luego de un año; a las dos profundidades relevadas no se encontraron diferencias significativas entre el suelo descompactado previamente y el testigo, luego de un año del pasaje del descompactador (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad aparente del suelo (Mg m^{-3}) con y sin descompactación después de un año.
Table 1. Soil bulk density (Mg m^{-3}) with and without soil loosening over a period of one year.

Fecha	03/09/2008		13/09/2009	
Profundidad	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m
Sin descompactar	1,43 aA	1,38 aA	1,40 aA	1,32 aA
Descompactado	1,29 bA	1,25 bA	1,38 aB	1,29 aA

La descompactación se realizó en mayo del 2008.

Letras minúsculas diferentes en cada columna indican diferencia significativa ($p < 0,05$).

Letras mayúsculas diferentes en cada línea indican diferencia significativa ($p < 0,05$)

The decompaction was carried out in May 2008.

Different low case letters within each column indicate significant differences ($p < 0.05$).

Different letter high case within each line indicate significant difference ($p < 0.05$).

Resistencia mecánica

Las curvas de resistencia a la penetración (Fig. 1) en el testigo sin descompactar, ponen en evidencia el desarrollo de una capa de suelo compactada a una profundidad de 0,1 m, luego de diez años de siembra directa. Esta capa supera ampliamente los 2 MPa de resistencia a la penetración indicados como limitantes para el desarrollo de los cultivos por Bengough (2011). Luego del tratamiento mecánico del suelo, en las líneas de acción de las rejas del descompactador, se registra una reducción de la resistencia a la penetración a valores compatibles con el desarrollo de raíces hasta los 0,15 m. A los 0,2 m, ya no se encuentran diferencias con el tratamiento sin descompactar, lo que permite inferir que se alcanzó la profundidad crítica señalada por Spoor (2006). En el espacio entre las líneas de acción de las rejas, los efectos del tratamiento mecánico del suelo se reducen desde la superficie y no presentan diferencias con el suelo sin descompactar desde los 0,15 m de profundidad. No queda en claro si esto se debe a que el suelo en el espacio entre líneas no fue afectado por el tratamiento mecánico o bien a que se generaron fisuras no registradas por el penetrometro, como las descritas para este tipo de descompactadores por Spoor et al. (2003).

En coincidencia con lo planteado por Álvarez et al. (2009) los efectos de la descompactación sobre la resistencia a la penetración se pierden luego de un año, del mismo modo que con la densidad aparente (Tabla 1).

Infiltración básica

Los resultados de IB para las condiciones ensayadas muestran una mayor tasa de infiltración para el tratamiento descompactado, siendo estadísticamente significativa ($p < 0,05$). La mayor tasa de infiltración puede explicarse por el aumento en la proporción de macroporos y mesoporos como consecuencia de la aplicación del escarificador (Bonel et al., 2004). Este efecto se va diluyendo a medida que pasa el tiempo desde la

aplicación de la labranza, hasta casi retrogradar a la situación previa a la labor aplicada (Fig. 2).

La persistencia del efecto de la descompactación sobre la infiltración básica por más tiempo que los efectos medidos en la densidad aparente y la resistencia a la penetración, indica que a pesar de la pérdida de porosidad total asociada al incremento de la densidad aparente, persisten en el suelo canales preferenciales (fisuras) que facilitan el flujo del agua. Por lo tanto se coincide con Spoor et al. (2003), en que la descompactación con herramientas de montantes angulados tiende a producirse con un patrón de fisuras menos susceptible a la recompactación que cuando se produce por roturación, y por lo tanto no se puede refutar la hipótesis de trabajo.

CONCLUSIONES

En sistemas de siembra directa continua, la descompactación del suelo con escarificadores de montantes angulados tiende a producirse por la generación de fisuras más que por roturación. De este modo, aun cuando el suelo retorne rápidamente a su condición inicial, en lo que respecta a los valores de densidad aparente y resistencia a la penetración, el incremento en infiltración básica solo se pierde luego de tres años desde la descompactación.

LITERATURA CITADA

- Abu Hamdeh, N.H. 2003. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1213-1219.
- Alvarez, C.R., M. Torres Duggan, E.R. Chamorro, y M.A. Taboada. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo* 27(2):159-169.
- Balbuena, H.R., G.F. Botta, y E.R.D. Rivero. 2009. Herramientas de labranza para la descompactación del suelo agrícola. Editorial Orien-

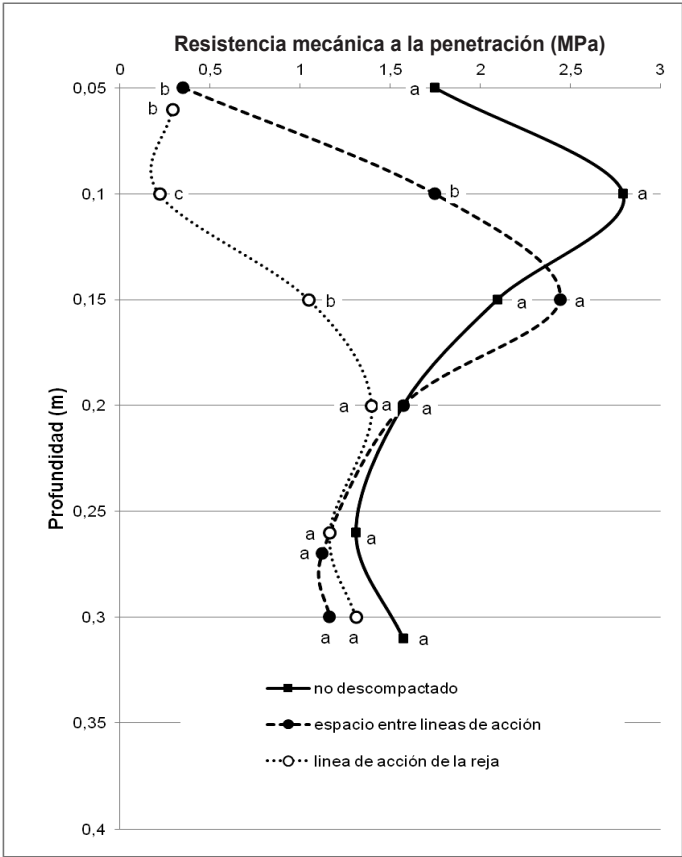


Fig. 1. Resistencia mecánica a la penetración en el suelo sin descompactar y en el suelo descompactado, en la línea de acción de la reja y entre las líneas.

Letras diferentes entre tratamientos indican diferencia significativa ($p < 0,05$).

Fig. 1. Penetration resistance in compacted and no-compacted soil, in the working line of the tool and between the lines.

Different letters within treatments show significant differences ($p < 0.05$).

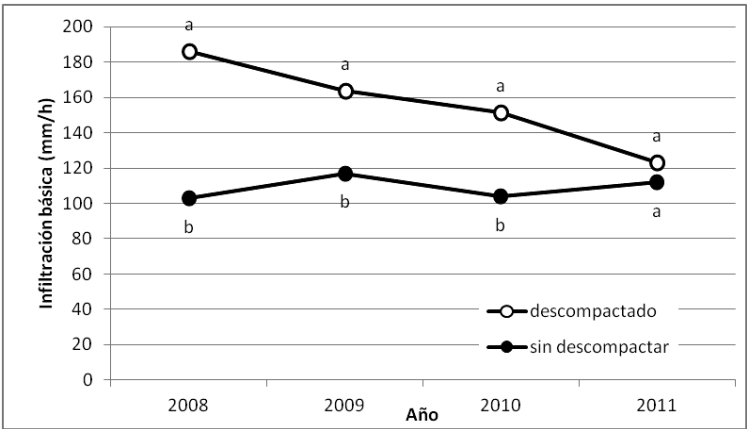


Fig. 2. Infiltración básica (mm h^{-1}) desde 2008 hasta 2011, para los tratamientos con y sin descompactación.

Letras diferentes entre tratamientos indican diferencia significativa ($p < 0,05$).

Fig. 2. Basic infiltration rates (mm h^{-1}) between 2008 to 2011, with and without soil loosening.

Different letters within treatments show significant differences ($p < 0.05$).

- tación Grafica, Buenos Aires, Argentina.
- Bengough, A.G., B.M. McKenzie, P.D. Hallett, and T.A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62(1):59-68.
- Bonel, B.A., J. Denoia, M. Costanzo, G. Giubileo, y G. Zerpa. 2004. Efecto de la labor de escarificado sobre un Argiudol Vertico bajo siembra directa continua. *Cien. Inv. Agr.* 31(3):187-196.
- Bonel, B.S., S. Montico, G. Sponda, y N. Spurio. 2005. Descompactación del suelo mediante el uso de escarificadores en Argiudoles típicos del sur de Santa Fe. En D. Jorajuría (ed.) *Reología de suelos bajo tráfico*. EDULP, La Plata, Argentina.
- Busscher, W.J., J.R. Frederick, and P.J. Bauer. 2000. Timing effects of deep tillage on penetrometer resistance and wheat and soybean yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:999-1003.
- Chagas, C.Y., H.J. Marelli, y O.J. Santanatoglia. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol Típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 12:11-16.
- Chan, K.Y. 2002. Bulk density. p. 128-130. In R. Lal (ed.) *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York, USA.
- Díaz-Zorita, M., G.A. Duarte, and J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 65:1-18.
- Domínguez, J., J.M. Ressaia, D. Jorajuría, R.H. Balbuena, y G. Mendivil. 2000. Reología del suelo traficado bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. *Avances en Ingeniería Agrícola*. Editorial Orientación Gráfica SRL, Buenos Aires, Argentina.
- Dorner, J., and R. Horn. 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil & Tillage Research* 102:225-232.
- Ewen, B., J. Schoenau, M. Grevers, and G. Weiterman. 2012. Effects of paratilling on soil bulk density and infiltration. In *Proceedings of the Soils and Crops Workshop*. University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Falotico, J.L., G.A. Studdert, and H.E. Echeverría. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 17(2):9-20.
- Ferreras, L., J.L. Costa, F.O. García, and C. Pecorari. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil & Tillage Research* 54:31-39.
- Fontanetto, H., y O. Keller. 1998. Evolución de propiedades físicas y químicas del suelo con diferentes secuencias de pasturas y cultivos en siembra directa. En *Resúmenes de Reunión Técnica sobre Viabilización de la Siembra Directa en Sistemas Mixtos de Producción*. PROCISUR-INIA. 22 al 24 de abril. INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay.
- GeoINTA. 2014. Disponible en <https://www.geo-inta.intagov.ar/suelos> (Consulta 15 enero 2014).
- Guecaimburu, J.M., R.M. Introcaso, J.L. Torella, E. Wasinger, y E.C. Fanta. 2005. Impacto inicial de diferentes sistemas de manejo sobre algunos parámetros físicos del suelo y el cultivo de soja. En *Actas del VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Merlo. San Luis. 9 al 12 de noviembre. Facultad de Ingeniería y Cs. Económico-Sociales, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina.
- Lyman-Ott, R., and M.T. Longnecker. 1993. An introduction to statistical methods and data analysis. Duxbury Press, Belmont, California, USA.
- Medvedev, V.V. 2009. Soil penetration resistance and penetrometers in studies of tillage technologies. *Eurasian Soil Science* 42(3):299-309.
- Mohanty, M., K.K. Bandyopadhyay, D.K. Painuli, P.K. Ghosh, A.K. Misra, and K.M. Hati. 2007. Water transmission characteristics of a Vertisol and water use efficiency of rainfed soybean (*Glycine max* L. (Merr.)) under subsoiling and manuring. *Soil and Tillage Research* 93(2):420-428.
- Montico, S., N. Di Leo, y G. Zerpa. 2002. Compactación en un suelo escarificado a través de lógica difusa. *Rev. Fac. Cs. Agr. UNCuyo* 34(2):57-64.
- Navarrete, D.M., G.C. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, et al. 2007. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturalization in the Argentine Pampas. *Environment, Development and Sustainability* 11(3):621-638.
- Quiroga, A., O. Ormeño, y N. Peinemann. 1998. Efectos de la siembra directa sobre las propiedades físicas de los suelos. p. 237-243. En J. Panigatti, H. Marelli, D. Buschiazzi y R. Gil. (eds.) *Siembra directa*. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- Raper, R.L., E.B. Schwab, K.S. Balkcom, C.H. Burmester, and D.W. Reeves. 2005. Effect of annual, biennial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern US silt loam soils. *Appl. Eng.*

- Agric. 21:337-343.
- Reposo, G., y V. Bonvecchi. 2012. Efectos de la descompactación sobre propiedades físicas de un suelo franco limoso. En XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16 al 20 de abril. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Ressia, J.M., L. Lázaro, G.O. Mendivil, M. Ise, N. García-Dutriez, G.F. Botta, M.A. Agostini, M.C. de Pablo, y R.H. Balbuena. 2010. Evaluación de dos descompactadores en siembra directa. *Agro-Ciencia* 26(1):7-14.
- Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy* 15(87):24-31.
- Schäffer, B., M. Stauber, R. Müller, and R. Schulin. 2007. Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of Soil Science* 58(5):1062-1073.
- Smith, K. A. 2002. Soil and environmental analysis: physical methods. Revised and Expanded. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Soil Science Society of America. 1996. Glossary of Soil Science Terms. Madison, Wisconsin, USA.
- Spoor, G., F.G. Tjink, and P. Weisskopf. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage Research* 73:175-182.
- Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management* 22(2):113-122.
- Suwardji, P., and P.L. Eberbach. 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling on conventional cultivation. *Soil Tillage Research* 49:65-77.
- Taboada, M.A. 1998. Compactación superficial causada por la siembra directa y regeneración estructural en suelos franco limosos pampeanos. En XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 4 al 7 de mayo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, Argentina.
- Twomlow, S.J., R.J. Parkinson, and I. Reid. 1994. Temporal changes in soil conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. *Soil & Tillage Research* 31:31-47.
- Vogel, H.J., and K. Roth. 1998. A new approach for determining effective soil hydraulic functions. *European Journal of Soil Science* 49:547-556.